

Исследование влияния параметров диода Ганна и неоднородности легирования на его режимы работы с помощью физико-топологической модели

А.А. Цымбалов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: При моделировании процессов переноса горячих носителей в сильных электрических полях и применении различных математических соотношений, описывающих эти процессы, обычно не учитывают неоднородности примесного легирования, которые влияют на распределение поля и плотность выходного тока. В настоящей работе был проведен расчет распределения поля вдоль длины чипа диода. При этом была использована одномерная модель и феноменологический подход к описанию поведения носителей. Полученные результаты позволяют оценить влияние неоднородности на режимы работы диода Ганна и могут быть использованы для создания моделей более высоких порядков.

Ключевые слова: диод Ганна, численное моделирование, неоднородность легирования, физико-топологическая модель.

При рассмотрении процессов дрейфа и диффузии носителей в условиях воздействия сильного постоянного поля воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\partial n_e / \partial t = (1/q) \Delta j_n - g_n + r_n,$$

$$j_n = q(\mu_n n_e E + D_n \Delta n_e),$$

$$\partial n_p / \partial t = -(1/q) \Delta j_p + g_p - r_p,$$

$$j_p = q(\mu_p n_p E - D_p \Delta n_p),$$

$$j = j_p + j_n + j_{cm},$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{q(n_p + N_A - n_e - N_D)}{\epsilon \epsilon_0}.$$

Здесь q - заряд электрона; j_n, j_p - электронный и дырочный токи; n_e, n_p - концентрация электронов и дырок соответственно; φ - электростатический потенциал; E - вектор напряженности электрического поля; D_n, D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок; μ_n, μ_p - подвижность электронов и дырок; ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; g_n, g_p - скорость генерации электронов и

дырок; r_n , r_p - скорость рекомбинации электронов и дырок соответственно; $j_{см} = -\varepsilon\varepsilon_0(\partial/\partial t)\Delta\varphi$ вектор плотности тока смещения; N_d , N_a - концентрация доноров и акцепторов.

Связь потенциала φ с напряженностью электрического поля E записывается следующим образом:

$$E = -grad \varphi,$$

Оценка влияния неоднородности производилась при следующих приближениях модели:

1) в структуре «сэндвич» заряды движутся в одном направлении — от катода к аноду, поэтому можно полагать, что в плоскости поперечного сечения не изменяются ни плотность тока, ни электрическое поле.

2) так как диоды Ганна изготавливаются из полупроводника n-типа, то можно пренебречь дырочной проводимостью в рамках предложенной модели;

3) рассматривается случай наличия таких электрических полей, энергии которых недостаточно для актов ионизации атомов кристалла (герметизация, охлаждение и т.д.), что дает основание для пренебрежения генерацией и рекомбинацией ($g_n = g_p = r_n = r_p = 0$).

С учетом таких приближений уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{q(N_d - n_0)}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

Связь потенциала с напряженностью электрического поля:

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x},$$

Уравнение непрерывности:

$$\frac{\partial n_0}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial t},$$

$$jn = q(n\mu_n E + Dn \frac{\partial n_n}{\partial x}),$$

Эта модель была дополнена уравнениями разогрева, дрейфа и эффективной массы для электронов:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{qE\varphi}{m} - \frac{W-W_0}{\tau_w},$$

$$\frac{dp}{dt} = qE - \frac{p}{\tau_p},$$

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_0} \left(1 - p m \frac{W-W_0}{W_0}\right),$$

где p_m - безразмерный параметр, зависящий от типа полупроводника, определяемый из его дрейфовой характеристики (для GaAs : $p_m = 0,1$); τ_p, τ_w - времена релаксации квазиимпульса p и энергии W соответственно; m_0 - масса носителей на дне зоны проводимости; $W_0 = 3kT_0/2$ - средняя тепловая энергия носителей в отсутствии внешних полей; T_0 - комнатная температура. Полученная одномерная система уравнений решалась различными численными методами. При этом использовалось ступенчатое распределение концентрации (Рис. 1).

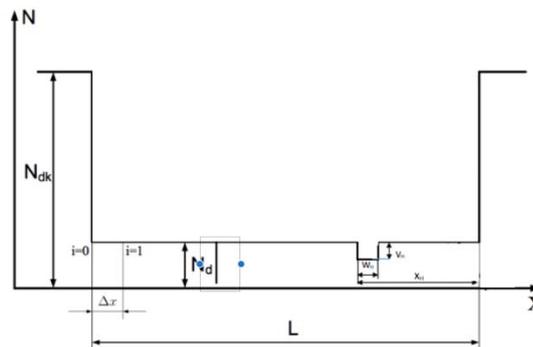


Рис. 1 – Графическое изображение одномерной модели. N_{dk} - концентрация в контактах, Δx - шаг по координате; i - номер шага; W_H, V_H, X_H - длина, величина, положение неоднородности соответственно, L - длина диода.

В результате проведенного численного моделирования распределения

поля вдоль длины диода получены результаты, в которых в качестве исходных были использованы различные параметры структуры GaAs (Рис. 2).

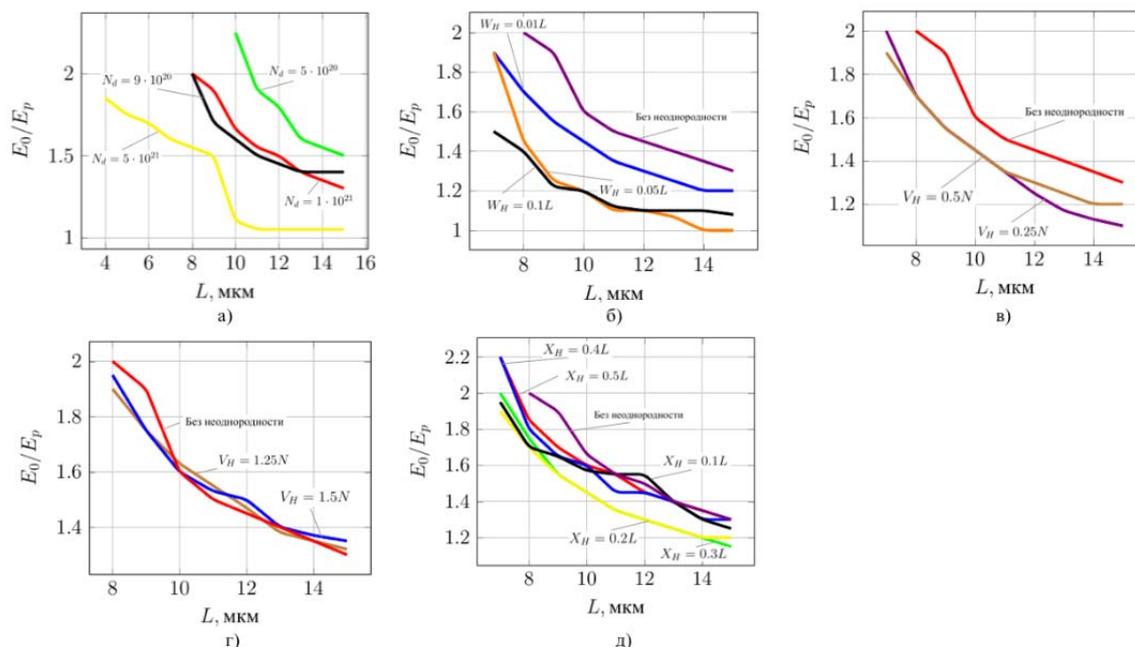


Рис. 2 – а) - зависимости предельных постоянных полей осуществления нестационарного режима работы в зависимости от концентрации и длины диода на GaAs; б) - влияние на режим работы диода Ганна положения неоднородности, $N = 1 \cdot 10^{21}$, $W_H = 0.01L$, $V_H = 0.5N$; в) - влияние на режим работы диода Ганна величины неоднородности, $N_d = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $X_H = 0.2L$, $W_H = 0.01L$; г) - влияние на режим работы диода Ганна величины неоднородности, $N_d = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $X_H = 0.2L$, $W_H = 0.01L$; д) - влияние на режим работы диода Ганна длины неоднородности, $N_d = 1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $X_H = 0.2L$, $V_H = 0.5N$.

Заключение

Из графика на рисунке 2(а) видно, что увеличение длины диода снижает величину предельного поля для осуществления нестационарного

режима работы.

Из графика 2(б) следует, что при фиксированных параметрах концентрации N_d , длины W_H и величины неоднородности V_H , для большинства длин диода большее влияние на режим работы оказывает смещение относительно катода на величину $0.2 - 0.3L$, то есть такое расположение неоднородности способствует образованию доменов (на больших длинах) и солитонов (на меньших длинах).

Из графиков на рисунках 2(в) и 2(г) следует, что при фиксированных параметрах концентрации N_d , длины W_H и положения неоднородности X_H , уменьшенное значение V_H способствует образованию доменов и солитонов. Увеличенная концентрация незначительно уменьшает значение предельных постоянных полей на малых длинах диода.

На графике 2(д) представлены зависимости предельных постоянных полей от величины неоднородности. Из графика видно, что при фиксированных параметрах концентрации N , положения X_H и длины неоднородности W_H пониженное значение концентрации способствует приложению меньших полей для длин диода, указанных на рисунке.

Изложенная методика численного моделирования и полученные результаты могут быть использованы в подобных моделях более высокого порядка (двухмерный и трехмерный случаи).

Литература

1. Механцев Е.Б., Кильметов Р.С. Исследование характеристик интегральных схем на основе физико-топологической модели: Учебное пособие // Таганрог: ТРТУ, 1997. 78 С.
2. Малышев В.А. Теория разогретых нелинейностей плазмы твердого тела.



- // Издательство Ростовского Университета. 1979. 264 С.
3. Малышев В.А. Бортовые активные устройства сверхвысоких частот. // Судостроение. 1990. 264 С.
4. Малышев И.В. Осадчий Е.Н., Филь К.А. Способы учета энергозависимости эффективной массы горячих носителей в объеме полупроводников типа $A^{III}B^V$ // Инженерный вестник Дона. 2017. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4396.
5. Shur M., GaAs devices and circuits. MICRODEVICES Physics and fabrication technologies 1987. 651 p.
6. Sze S., Physics of Semiconductor Devices: In 2 Books. 1984. 456 p.
7. Кэррол Д. СВЧ-генераторы на горячих электронах // Мир 1972. 385 С.
8. Богданов С.А., Захаров А.Г., И.В. Писаренко И.В. Влияние многозарядных примесных центров на распределение потенциала в приповерхностной области полупроводника // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1530
9. Ahmad Bayat, Design and implementation of X band Gunn diode oscillator International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.2, Issue.5, Sep-Oct. 2012 pp. 3908-3911.
10. Simone Montanari, Fabrication and characterization of planar Gunn diodes for Monolithic Microwave Integrated Circuits, Reihe Informationstechnik / Information Technology Band / Volume 9, 2005, 150 p.

References

1. Mekhancev E.B., Kilmotov R.S. Issledovanie harakteristik integralnyh skhem na osnove fiziko topologicheskoi modeli uchebnoe posobie. Taganrog. TRTU. 1997 78 p. [Investigation of the characteristics of integrated circuits based on the physico-topological model].
2. Malyshev V.A. Teorija razogrevnyh nelinejnostej plazmy tvjordogo tela. Izd.
-



Rostovskogo Universiteta. 1979. 264 p. [Theory of hot nonlinearities in solid state plasma].

3. Malyshev V. A. Bortovye aktivnye ustroystva sverhвысокoй частоты. Sudostroenie 1990. 264 p. [Onboard active devices of ultrahigh frequencies].

4. Malyshev I.V., Osadchij E.N., Fil K.A. Inzhenernyy vestnik dona (Rus). 2017 №4 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4396.

5. Shur M., GaAs devices and circuits. MICRODEVICES Physics and fabrication technologies 1987. 651 p.

6. Sze S., Physics of Semiconductor Devices: In 2 Books Mir. 1984. 456 p.

7. Kehrrol D. Svch generator na goryachih ehlektronah. Mir 1972 385 p. [Microwave generators on hot electrons].

8. Bogdanov S.A., Zaharov A.G., I.V. Pisarenko I.V. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus). 2013. №1. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1530

9. Ahmad Bayat, Design and implementation of X band Gunn diode oscillator International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.2, Issue.5, Sep-Oct. 2012 pp. 3908-3911.

10. Simone Montanari, Fabrication and characterization of planar Gunn diodes for Monolithic Microwave Integrated Circuits, Reihe Informationstechnik. Information Technology Band. Volume 9, 2005, 150 p.